

О.В.ХВОЩАН; Ю.И.КУРАШКО, канд.техн.наук; **В.В.ЛИТВИНОВ;
Ю.И.МЕЛЬХЕР**; ИИПТ НАН Украины, Николаев

ОПТИМИЗАЦИЯ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ

На основі аналізу комплексу електромагнітних, теплових, температурних співвідношень визначено оптимальні показники габаритів високовольтного трансформатора занурювальних електродозрядних пристроїв.

On the basis of analysis of complex of electromagnetic, thermal, temperature correlations the optimum indexes of sizes of high-voltage transformer of submersible electrodischarge devices are determined.

Введение. Дальнейшее развитие электродозрядного метода увеличения притока нефти в скважины, позволяющее расширить спектр его использования при уменьшении времени ремонтных и профилактических работ на скважинах, ставит ряд задач, направленных как на уменьшение габаритных размеров скважинного устройства, так и на возможность увеличения его энергетических показателей при приемлемом температурном режиме работы. Учитывая, строго говоря, противоречие в возможности достижения наилучших показателей по каждому направлению (повышение энергетических показателей при уменьшении габаритов ведет к резкому увеличению удельных потерь и, соответственно, ухудшению теплового режима работы устройства в условиях высокой внешней рабочей температуры), следует определить зависимости, позволяющие оптимизировать решение комплекса задач в целом.

В связи с наибольшей концентрацией электротехнических компонентов одним из наиболее уязвимых элементов при работе погружного скважинного комплекса является зарядный блок, содержащий полупроводниковые элементы инвертора и выпрямителя, систему управления инвертором, высоковольтный трансформатор. Основным тепловыделяющим и массивным элементом зарядного блока является высоковольтный трансформатор, поэтому **целью** настоящей работы стало определение оптимального комплекса массогабаритных, тепловых и температурных показателей работы данного элемента.

Постановка задачи. Проведенные ранее работы [1] позволили сделать вывод о возможности создания погружного скважинного устройства с полезной передаваемой в накопительный конденсатор мощностью 1 кВА при про-

течении постоянного тока по кабелю, соединяющему наземную и погружную части. Учитывая работу преобразователя на индуктивно-емкостной преобразователь, возникает необходимость расчета высоковольтного трансформатора на удвоенную габаритную мощность [2], то есть $P_{\text{габ}} = 2 \text{ кВА}$.

Одной из особенностей погружных скважинных устройств является расположение оборудования в цилиндрическом корпусе крайне ограниченных габаритов (внешний диаметр – 102 мм, внутренний – 88 мм), определяемых допустимым диаметром обсадной трубы скважины и высоким (до 50 МПа) гидростатическим давлением. Наилучшим вариантом по заполнению рабочего пространства корпуса было определено использование стержневого трансформатора с магнитопроводом квадратного сечения стороной 15 мм и шириной окна 20 мм (рис. 1), что позволяет, соблюдая необходимые изоляционные промежутки, приблизить часть поверхности обмотки и магнитопровода к стенке корпуса для улучшения теплоотвода.

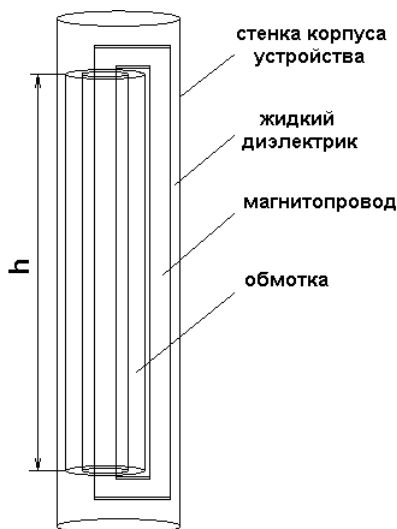


Рисунок 1 – Высоковольтный трансформатор

В качестве материала магнитопровода был выбран сердечник из нанокристаллического железа фирмы МЕЛТА (г. Киев, [3]), имеющий гораздо лучшие показатели, как по величине индукции, так и по удельным потерям в сравнении с широко использующимися в настоящее время ферритовыми сердечниками. Согласно представленной производителем информации была определена зависимость удельных объемных потерь в материале магнитопровода от индукции и частоты:

$$q_{cm} = 0,038 \cdot B^2 \cdot f^{1,65}, \quad (1)$$

где q_{cm} – удельные объемные потери в стали, Вт/м³; B – индукция, Тл; f – частота, Гц.

Приняв за h высоту обмоток трансформатора, учитывая особенности конструктивного исполнения магнитопровода и наличие необходимых зазоров, общие потери в магнитопроводе определяются согласно формуле

$$Q_{cm} = 1,58 \cdot 10^{-4} \cdot (0,132 + 2h) \cdot q_{cm}, \quad (2)$$

где Q_{cm} – потери в магнитопроводе, Вт; h – высота обмоток, м.

Используя формулы по электромагнитному расчету трансформатора и потерь в нем [4], достаточно просто определить выражение, связывающее потери в обмотке трансформатора с его габаритной мощностью, частотой протекающего тока и индукцией материала магнитопровода:

$$Q_m = \frac{j \cdot \rho_m \cdot (l_{\phi 1} + l_{\phi 2})}{4,44 \cdot S_{\phi \phi} \cdot K_c} \cdot \frac{P_{заб}}{f \cdot B}, \quad (3)$$

где Q_m – потери в обмотке, Вт; j – плотность тока в обмотках трансформатора, А/м²; ρ_m – удельное сопротивление материала обмотки (для медного провода $\rho_m = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м); $l_{\phi 1}$ – средняя длина витка первичной обмотки, м; $l_{\phi 2}$ – средняя длина витка вторичной обмотки, м; $S_{\phi \phi}$ – эффективное сечение магнитопровода, м²; K_c – коэффициент заполнения магнитопровода сталью; $P_{заб}$ – габаритная мощность трансформатора, ВА.

Габаритные размеры вторичной обмотки трансформатора и число ее витков связаны выражением

$$W_2 = \frac{K_m \cdot h \cdot h_m}{d_2^2},$$

где W_2 – число витков вторичной обмотки; h_m – толщина намотки вторичной обмотки, м; d_2 – диаметр провода вторичной обмотки, м; K_m – коэффициент заполнения катушки вторичной обмотки медью (с учетом закраин, межслойной изоляции, изоляции провода, технологических зазоров $K_m = 0,2$). Используя данное выражение, формулу (3) и формулы электромагнитного расчета трансформатора, была получена зависимость, связывающая высоту обмоток с габаритной мощностью, частотой и индукцией:

$$h = \frac{1}{1,11 \cdot \pi \cdot j \cdot K_m \cdot K_c \cdot h_m \cdot S_{\phi \phi}} \cdot \frac{P_{заб}}{f \cdot B}. \quad (4)$$

Для упрощения расчета температурного режима работы трансформатора его первичная и вторичная обмотки сведены в один цилиндр (см. рис. 1) с внутренним диаметром, соответствующим расположению первого слоя первичной, и внешним, определяющимся положением последнего слоя вторичной обмотки. Это дало возможность определить удельные объемные потери в обмотках:

$$q_m = \frac{603 \cdot Q_m}{h}, \quad (5)$$

где q_m – удельные потери в обмотках, Вт/м³.

Система уравнений [1]–[5] решалась при помощи программы *Mathcad 2001 Professional*. Учитывая опыт создания высоковольтного погружного оборудования, заранее были определены параметры радиального сечения высоковольтного трансформатора ($l_{e1} = 0,098$ м; $l_{e2} = 0,151$ м; $h_m = 0,007$ м). Согласно технической информации, представленной производителем, $S_{эфф} \cdot K_c = 1,62 \cdot 10^{-4}$ м². Плотность тока, протекающего по обмоткам трансформатора при отсутствии принудительного охлаждения, допустимо выбирать $j = 2,2 \cdot 10^6$ А/мм².

Теоретический анализ тепловых режимов работы зарядного блока проводился с помощью программы для расчета различного рода физических полей *Femlab 3.1*, позволяющей, в частности, моделировать переходные характеристики и стационарную тепловую картину одно-, дву- и трехмерных конфигураций методом конечных элементов с достаточно высокой точностью. Трехмерная модель высоковольтного трансформатора представлена на рис. 1. При составлении модели принимались следующие допущения:

- первичная и вторичная обмотки, каркасы, изоляционные слои были объединены в один цилиндр, теплофизические характеристики которого соответствовали меди; теплофизические характеристики материала, из которого выполнен магнитопровод (сердечник из нанокристаллического железа), соответствовали стали;
- наличие стальной стенки трубы не учитывалось; граничное условие для образующей поверхности цилиндрической области, заключающей модель – условие постоянной температуры, поддерживаемой внешней средой;
- цилиндрическая область заполнена жидким диэлектриком (трансформаторным маслом) и не ограничена в осевой плоскости.

Данные, использованные при составлении модели высоковольтного трансформатора, приведены в таблице.

Элемент	Магнито-провод	Обмотка	Жидкий диэлектрик
Материал	сталь	медь	трансформаторное масло
Удельная мощность q , Вт/м ³	10820	12200	-
Плотность ρ , кг/м ³	7870	8700	880,3
Удельная теплоемкость C_m , Дж/(кг·К)	440	385	1666
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	76,2	400	0,11

Результаты исследований. Зависимость высоты обмоток (и, соответственно, высоты всего трансформатора) от рабочей индукции материала магнитопровода и частоты напряжения, преобразуемого трансформатором, представлена на рис. 2.

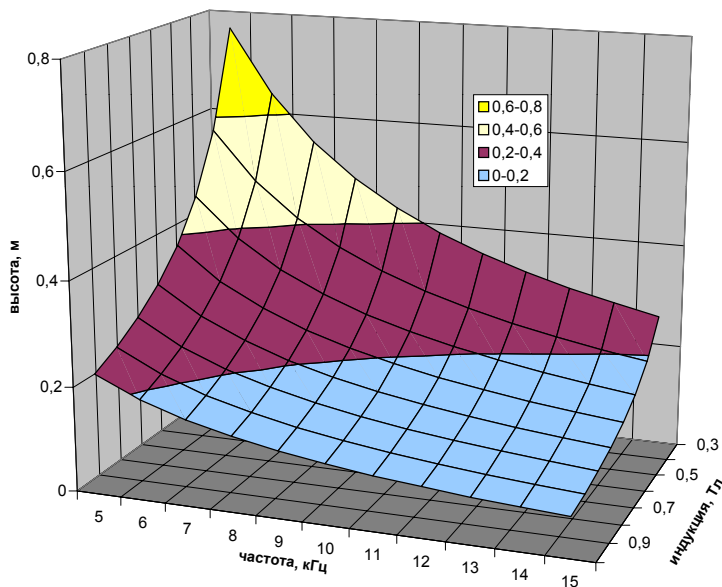


Рисунок 2 – Зависимость высоты обмоток трансформатора от индукции и частоты

С увеличением индукции и частоты, как следует из (4), габариты трансформатора уменьшаются в обратной пропорциональности. Уменьшение габаритов ведет к снижению внешней поверхности и ухудшению условий теплоотвода из внутренних слоев трансформатора. Поэтому интерес представляет также рассмотрение вопроса о потерях при работе трансформатора в диапазоне частот (5...15) кГц и индукций (0,3...1) Тл (рис. 3). Учитывая допущения, приведенные выше и не соответствующие работе трансформатора в натуральных условиях (наличие источников тепла в торцах цилиндрической поверхности), целесообразно представить информацию в относительных единицах (в качестве базовых приняты наименьшие значения величин массивов). Для перехода к абсолютным значениям следует определить реальный температурный режим работы трансформатора в одной из точек массива.

Как видно из рис. 3, в диапазоне рабочих частот и индукций существует область с наименьшими возможными потерями. Расчет показал, что наименьшие потери наблюдаются при равенстве потерь в материале магнито-

провода и обмоток ($Q_{cm} = Q_m$), при этом расчетная высота обмотки практически неизменна и равна 0,021 м. В случае увеличения одной из составляющих общие потери резко возрастают.

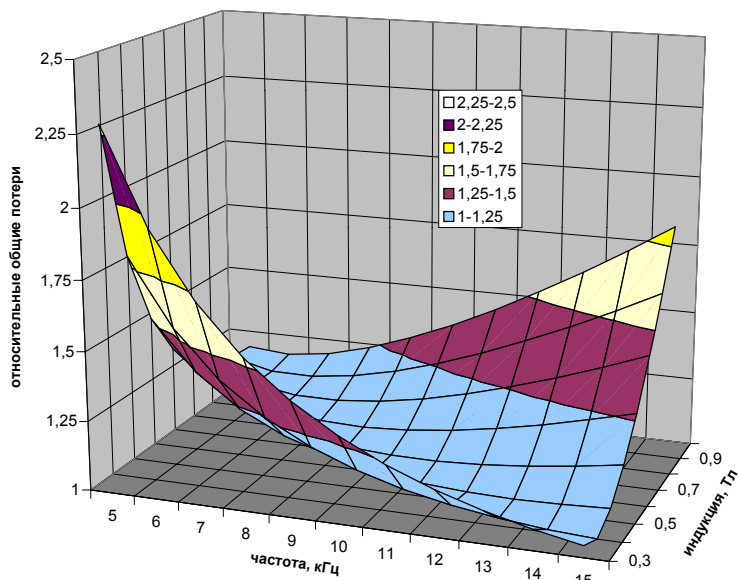


Рисунок 3 – Зависимость общих потерь в трансформаторе от индукции и частоты

Результаты расчета температурного режима работы трансформатора представлены на рис. 4. Представлены данные по относительному перегреву магнитопровода трансформатора, так как именно его материал является на сегодняшний день наиболее подверженным выходу из строя при перегреве (рабочая температура – 120 °С). Выбор расчетной точки трансформатора в сторону значений рабочих частоты и индукции, меньших чем оптимальные, приводит к увеличению габаритов данного элемента при снижении величины удельных потерь и температуры перегрева. В то же время, при выборе больших значений частоты и индукции увеличение общих потерь сопровождается уменьшением габаритных размеров и резкому росту перегрева внутренних областей трансформатора.

Таким образом, при расчете высоковольтного трансформатора для погружных устройств, работающих в экстремальных условиях, рекомендуется придерживаться оптимального соотношения рабочих частот и индукций. Так, оптимальной высотой обмоток трансформатора мощностью 2 кВА, согласно проведенного анализа, является 0,021 м. Расчет трансформатора для устройств, работающих в условиях пониженных рабочих температур окру-

жающей среды, можно производить при некотором увеличении частоты и индукции, что даст возможность уменьшить габариты погружной части устройства при его надежной работе.

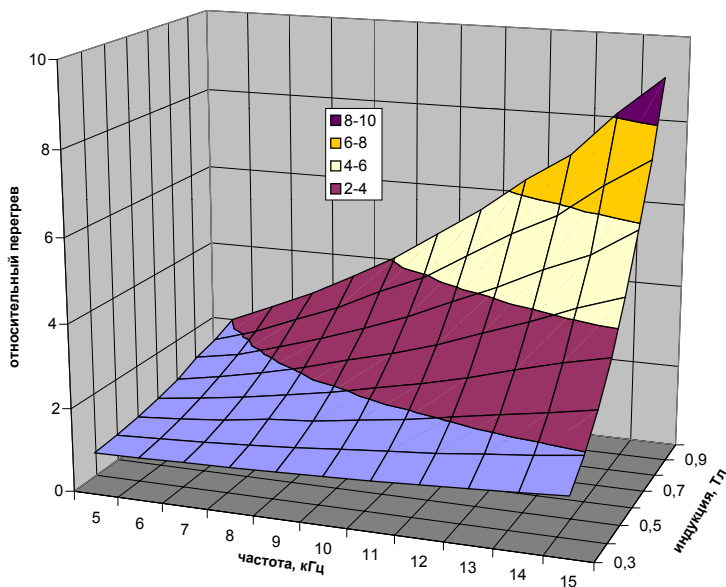


Рисунок 4 – Перегрев магнитопровода трансформатора

Список литературы: 1. О.В.Хвоцан, Ю.И.Курашко, В.В.Литвинов. Повышение эффективности зарядных процессов электроразрядных погружных комплексов увеличенной мощности // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2006. – № 37. – С.86-92. 2. И.В.Пентегов. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – Киев: Наук. думка, 1982. – 424 с. 3. Аморфные и нанокристаллические сплавы. Общая информация. Технический бюллетень ТВ-ГЛ. <http://www.novitech.com>. 7с. 4. П.М.Тихомиров. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

Поступила в редколлегию 07.11.2007